

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS LAGES
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Douglas Fernandes

Projeto acústico de salas: uma análise acústica do auditório do IFSC - Campus Lages

LAGES
2022

Douglas Fernandes

Projeto acústico de salas: Uma análise acústica do auditório IFSC - Campus Lages

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica
Orientador: Prof. Natalia Madalena Boelter

Lages

2022

Douglas Fernandes

Projeto acústico de salas: Uma análise acústica do auditório IFSC - Campus Lages

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica e aprovado em sua forma final pelo Curso de graduação em Engenharia Mecânica

Lages, 08 de dezembro de 2022.

Prof. orientadora
Natalia Madalena Boelter

Banca Examinadora:

Prof.(a) Natalia Madalena Boelter)
Orientador(a)
Instituição IFSC

Prof.(a) Anderson Luis Garcia Correia
Avaliador(a)
Instituição IFSC

Prof.(a) Rafael Gustavo Schreiber
Avaliador(a)
Instituição IFSC

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais, ao LM Team que me manteve em foco, a Carlos Augusto, Marco Martins e Diogo França que me deram o maior incentivo e ferramentas para continuar em curso e não desistir. Ao professor Miro Wagner, amigo que me esclareceu dúvidas e esteve comigo em momentos difíceis. Dedico também à professora Natalia Boelter por todo apoio e inspiração que me prestou durante a elaboração deste trabalho. Dedico especialmente este trabalho a Stephen Fitzpatrick, Audun Laading, Mc DeMarco, Michael Jackson e Phil Collins, pessoas que me devolveram as esperanças para acreditar nos meus sonhos através do amor transmitido por seus trabalhos genuinamente distintos e originais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a professora Natalia por ter topado o desafio e colaborado com a construção deste trabalho, bem como, o professor Anderson Correia que sempre esteve disposto a esclarecer minhas dúvidas e ao professor Rafael Schreiber que me apoiou quando tive minhas maiores incertezas e dificuldades.

RESUMO

No projeto acústico de diferentes ambientes, como um estúdio musical, uma sala de concertos ou um auditório, faz-se necessária uma análise rigorosa dos parâmetros acústicos do local e como as superfícies se comportam de acordo à excitação sonora exercida dentro da sala. O tema central da engenharia acústica consiste em como manipular as reflexões que afetam a inteligibilidade do som internamente em um ambiente e como controlar o som que pode ser enviado para o meio externo, ou seja, estudar a interface em que o som é transmitido de um meio para outro. Este trabalho objetiva-se em realizar um projeto acústico de tratamento sonoro do auditório do IFSC - Campus Lages, a fim de propor melhorias de qualidade, inteligibilidade e conforto acústico para palestras, aulas e apresentações. Os métodos utilizados foram baseados na bibliografia utilizada, análise empírica da estrutura, construção e materiais. Neste trabalho, não foi levado em consideração fatores de tratamento sonoro para apresentações musicais (bandas, orquestras, *DJs*, etc). Foi dada ênfase para fontes de áudio singulares com ou sem auxílio de aparato eletrônico. Os tempos de reverberação foram determinados através da acústica geométrica com o método SPPS através do software I Simpa. Os parâmetros obtidos foram comparados com os apresentados por norma da ABNT NBR 12 179, os resultados mostram que as condições de conforto acústico não são as ideais. A definição, assim como o tempo de reverberação apresentaram valores acima dos recomendados pelas normas, através do levantamento do coeficiente de absorção sonora de cada material e das superfícies do auditório, para efeito dos cálculos de tempo de reverberação, foi elaborada uma proposta de adequação para a melhoria da qualidade acústica do ambiente.

Palavras-chave: Som. Simulação Acústica. Aulas.

ABSTRACT

In the acoustic design of different environments, such as a music studio, a concert hall or an auditorium, a rigorous analysis of the acoustic parameters of the place and how the surfaces behave according to the sound excitation exerted inside the room is necessary. The central theme of acoustic engineering consists of how to manipulate the reflections that affect the intelligibility of sound internally in an environment and how to control the sound that can be sent to the external environment, that is, studying the interface in which the sound is transmitted from a middle to another. This work aims to carry out an acoustic project for the sound treatment of the auditorium of the IFSC - Campus Lages, in order to propose improvements in quality, intelligibility and acoustic comfort for lectures, classes and presentations. The methods used were based on the bibliography used, empirical analysis of the structure, construction and materials. In this work, sound treatment factors for musical performances (bands, orchestras, DJs, etc.) were not taken into account. Emphasis was placed on singular audio sources with or without the aid of electronic devices. The reverberation times were determined through geometric acoustics with the SPPS method using the I Simpa software. The parameters obtained were compared with those presented by ABNT NBR 12 179, the results show that the acoustic comfort conditions are not ideal. The definition, as well as the reverberation time, showed values above those recommended by the standards, through the survey of the sound absorption coefficient of each material and the surfaces of the auditorium, for the purpose of reverberation time calculations, an adequacy proposal was elaborated for improving the acoustic quality of the environment.

Keywords: Sound. Acoustic Simulation. Classes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tubo infinito com pistão em movimento harmônico simples	16
Figura 2 - Detalhe da medição do decaimento da pressão sonora (T_{60})	21
Figura 3 - Tempo de reverberação ótimo	27
Figura 4 - Inclinação do piso em uma sala	32
Figura 5 - Dimensão b do auditório	33
Figura 6 - Modelo de sala retangular importado no I Simpa	34
Figura 7 - Definição de malhas	34
Figura 8 - Tabela de materiais	35
Figura 9 - Fontes emissoras	35
Figura 10 - Sala pronta para simulação virtual	36
Figura 11 - Vista isométrica do modelo 3D do auditório do IFSC - Lages	37
Figura 12 - Vista frontal do modelo 3D do auditório do IFSC - Lages	37
Figura 13 - Vista superior do modelo 3D do auditório do IFSC - Lages	38
Figura 14 - Modelo 3D do auditório tetraedralizado e com as malhas definidas no I Simpa	39
Figura 15 - Árvore de malhas	39
Figura 16 - Características das fontes sonoras	40
Figura 17 - Modelo 3D no I Simpa com fontes, receptores e plano receptor	41
Figura 18 - Sala pronta para simulação virtual	42
Figura 19 - Definição no auditório	46
Figura 20 - Tempo central do auditório	47
Figura 21 - Material fono absorvente	48
Figura 22 - Placa perfilada acústica Sonex	48
Figura 23 - Definição corrigida com material fonoabsorvente aplicado	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - STI relacionado a qualidade do discurso	26
Tabela 2 - Tempo de reverberação do auditório	45
Tabela 3 - Valores qualitativos para o $D50$	47
Tabela 4 - Tempo de reverberação do auditório corrigido	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IFSC Instituto Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVO GERAL	13
1.2. Objetivos específicos	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. HISTÓRIA DA ACÚSTICA	15
2.2. Princípios Fundamentais da Acústica Geométrica	17
2.3. Conceitos e Aplicações para Projeto Acústico	18
2.4. Projeto Acústico, Equações e Diretrizes.	19
2.5. Fundamentos da ondas sonoras	20
2.6. Materiais e acústica	25
2.7. Diretrizes	26
2.8. Importância da acústica em ambientes de ensino	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1. VERIFICAÇÃO DAS ORIENTAÇÕES DE PROJETO	31
3.2. Modelo teste 3d e simulação numérica	33
3.3. Modelo final 3d e simulação numérica	36
4 RESULTADOS	42
4.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	43
4.2. DEFINIÇÃO (D50) E CLARIDADE (C50)	44
4.3. Tempo Central (ts)	47
4.4. Verificação da mudança de parâmetro com aplicação de material fonoabsorvente	48
5. CONCLUSÃO	51
6. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	52
REFERÊNCIAS	53
ANEXO A – Planta baixa do auditório	55

1. INTRODUÇÃO

No projeto de um estúdio musical, teatro, sala de concertos, auditório é necessário realizar uma análise muito rigorosa do ambiente. A dificuldade de se obter espaços relativamente grandes limita muito as opções e escolha do melhor ambiente. Dessa forma, a área deixa de ser uma variável, e as escolhas passam a ser direcionadas a métodos de adequação da sala para a atividade desejada.

O som produzido em um ambiente por uma fonte se propaga no ar atingindo as superfícies presentes no meio. Ao atingi-las, parte do som é refletida e volta a se propagar novamente pelo meio. Um ser humano que se encontra dentro da sala irá escutar uma combinação do som emitido diretamente da fonte com as ondas refletidas nas superfícies e objetos presentes. O tema central da engenharia acústica consiste em como manipular as reflexões que afetam a inteligibilidade do som internamente em um ambiente e como controlar o som que pode ser enviado para o meio externo, ou seja, estudar a interface em que o som é transmitido de um meio para outro.

Este trabalho pretende colaborar na difusão do estudo da acústica, bem como, a conscientização da problemática de desempenho acústico que existe em várias outras edificações de ensino como foi citado pelo referencial bibliográfico. Cabe o destaque que engenheiros e gerentes devem seguir instruções colaborativas para construir edifícios adequados com base em seus propósitos pretendidos, tendo em mente que cuidados devem ser tomados durante a fase de concepção do projeto, pois torna-se muito mais oneroso corrigir erros em edificações já construídas do que na fase de projeto para evitá-los.

1.1. OBJETIVO GERAL

Analisar um projeto acústico de um auditório para palestras baseando-se na estrutura física do auditório do IFSC - Campus Lages visando melhorar o conforto acústico e inteligibilidade auditiva.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir parâmetros ideais de auditório para fala, desconsiderando a propagação para o meio externo;
- Verificar se o auditório atende as orientações de projeto da bibliografia base deste trabalho;
- Modelar o auditório no Sketchup 2021.
- Realizar análise numérica para testar os parâmetros acústicos do auditório através do modelo 3D utilizando o I Simpa;
- Se aplicável, propor melhorias para adequação dos parâmetros para aumentar a inteligibilidade da fala, através de elementos defletores e aparatos para absorção sonora.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. HISTÓRIA DA ACÚSTICA

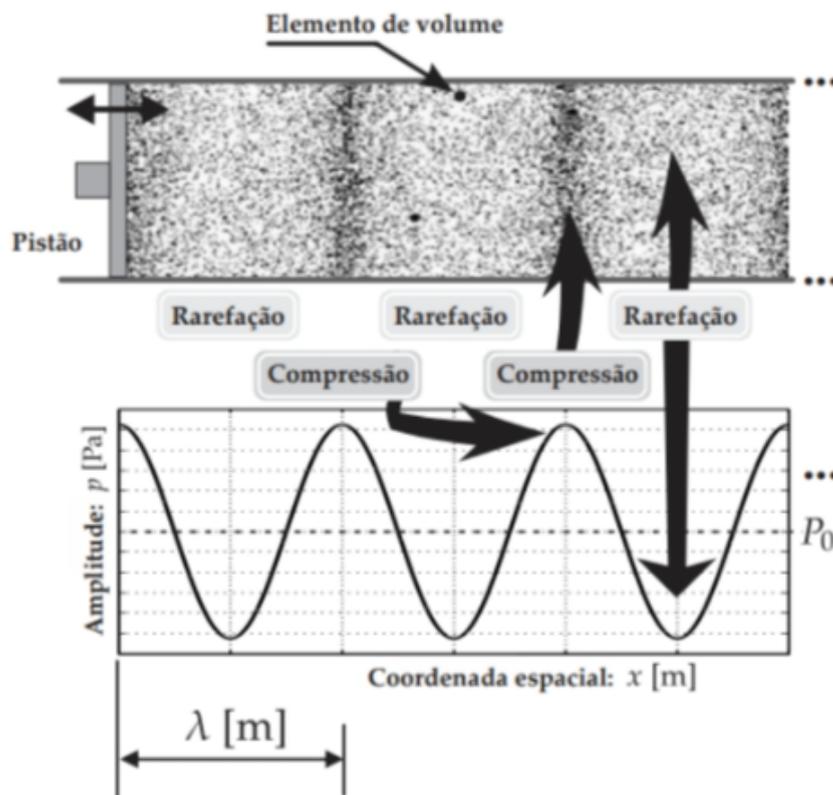
O surgimento da acústica não se dá a algum acontecimento específico, mas sim a um processo de evolução que aconteceu ao longo do tempo. De fato, o estudo e interesse pelo desconhecido é inerente ao ser humano e a evolução dos conhecimentos sobre acústica e sons, assim como quase tudo, aconteceu de forma natural em conjunto com a evolução humana. De acordo com pinturas de tumbas no antigo Egito, cerca de 1350 A.C (RONAN, 1987), já denota-se o interesse do ser humano pelo domínio dos sons, o que remete aos primeiros conhecimentos empíricos obtidos através da experiência. Posteriormente na China, cerca de 350 AC (RONAN, 1987) o imperador Huangundi encubiu seu ministro Ling Lun de estabelecer um padrão de altura para a música, especificando e classificando sons, dando início aos primeiros conhecimentos sobre escalas musicais, afinação e *pitch*. Através do estudo entre sinos afinados com o mesmo *pitch*, descobriu-se a ressonância. Na Grécia antiga foram realizados projetos que contribuíram para o desenvolvimento das ciências acústicas e da ótica em conjunto, desde as pesquisas de Pitágoras e Euclides sobre fontes sonoras (300 aC) (RONAN, 1987) até Arquimedes de Siracusa com a Lei do inverso do quadrado da distância para a intensidade acústica luminosa. Assim, na Grécia, foram estabelecidos os princípios fundamentais da acústica geométrica.

No renascimento, Galileu Galilei verificou que a sensação de altura (*pitch*) estava relacionada diretamente com a frequência (RONAN, 1987). É importante evidenciar que esta observação marca o início da física da música (acústica) como se conhece na atualidade.

Posteriormente, no século XIX cientistas como Hermann von Helmholtz e John William Strutt fizeram grandes descobertas em diversas áreas da ciência, inclusive na acústica. Entre os adventos de Helmholtz denotam-se avanços na medicina e física. Por outro lado, Strutt realizou grandes experimentos na universidade de Cambridge estudando a percepção biaural humana e introduziu o conceito de impedância acústica, campo este que estuda os problemas encontrados na propagação do som e os limites da audição humana (RONAN, 1987).

Em sua propagação, o som é representado por uma onda cossenoidal que possui uma velocidade de oscilação ou frequência, medida em Hertz [Hz], uma amplitude ou energia que se mede em decibéis (dB) e comprimento de onda interfere diretamente na frequência, sendo inversamente proporcional à esta última.

A figura 1 destaca um tubo hipotético de comprimento infinito com pistão em movimento harmônico simples. Compressão e rarefação do fluido são criadas pelo movimento oscilatório do pistão e pelas forças elásticas existentes entre as moléculas do fluido. O som é uma onda mecânica, ou seja, é necessário um meio (ou fluido) para que exista a propagação de uma onda sonora. A onda sonora, portanto, não se propaga no vácuo, como a onda eletromagnética (luz), já que, para que a perturbação seja sentida em um ponto distante do pistão, é preciso haver um meio elástico entre o pistão e o ponto remoto mostrado na figura 1.



Fonte: BRANDÃO,2016

Desta forma, analisando a onda gerada pelo pistão, esta possui as propriedades físicas listadas anteriormente, sendo: frequência (Hz) o número de oscilações completas realizadas por esta onda no período de 1 segundo, *pitch* está relacionado com o tom que esta onda gera ao atingir uma determinada **frequência** (nota lá = 440 Hz, por exemplo), **ressonância** está atrelada às propriedades físicas do meio em que a onda propaga-se. Quando uma fonte emite um som de frequência igual à frequência de vibração natural de um receptor, este é acusticamente excitado, amplificando a onda recebida pela fonte.

Reverberação (ou eco) diz respeito ao tempo (geralmente em segundos ou submúltiplos deste) em que o som ainda é ouvido após a fonte parar de emitir. Por exemplo, o estrondo gerado pelo estouro de um balão em um ginásio grande e vazio. Este pode ser ouvido por um curto ou longo período após o estouro, esse período de latência é o tempo de reverberação ou cauda de reverb que está diretamente ligado com a qualidade acústica do ambiente.

O som acontece pelos **movimentos de compressão e rarefação** gerados no fluido, neste caso, pelo pistão. Zonas de compressão acontecem quando mais moléculas de um fluido são agrupadas no mesmo volume e zonas de rarefação quando menos moléculas de um fluido ocupam o mesmo volume.

2.2. PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DA ACÚSTICA GEOMÉTRICA

A acústica geométrica baseia-se na propagação retilínea entre fonte e receptor. As teorias geométricas apresentam a vantagem de levar em conta a geometria da sala (p. ex., paredes inclinadas, superfícies finitas e irregulares etc.). Para sua implementação prática, se faz necessário a utilização de algum software, por exemplo, ODEON, EASE, CATT, RAIOS, etc. Cada um desses softwares possui suas vantagens, desvantagens e modelos matemáticos diferentes uns dos outros. Existem inúmeras formas de abordar a teoria geométrica e todas parecem ser uma aproximação da realidade. É impossível cobrir todas as peculiaridades de cada forma de implementação e, mesmo assim, conseguir mensurar todas as vantagens e desvantagens associadas (SVENSSON et al, apud BRANDÃO 2016).

2.3. CONCEITOS E APLICAÇÕES PARA PROJETO ACÚSTICO

Os seres humanos, através da fisiologia das orelhas, percebem fenômenos sonoros interpretados pelo cérebro que são chamados de sensações auditivas. Via de regra, o campo auditivo dos humanos estende-se a frequências entre 20 Hz a 20000 Hz. O que estiver abaixo de 20 Hz é infrassom e acima de 20000 Hz ultrassom (BRANDÃO, 2016). Este último, por sua vez, é amplamente utilizado na área da medicina em exames, por exemplo. Como o projeto acústico trata de uma construção civil onde sons precisam ser entendidos por seres humanos, será dada ênfase apenas na faixa de frequências audíveis, pois estudar outras além destas, estaria fora da proposta deste trabalho.

Pode-se classificar as frequências audíveis em qualidades. Alguns autores estabelecem uma faixa de transição entre estas, possibilitando a qualificação entre graves, médias e agudas. As ondas de alta frequências são entendidos como sons agudos (voz feminina, pratos de uma bateria, as notas à direita de um piano, os pneus de um carro deslizando no asfalto), as de baixa frequência sons graves (voz masculina, *kick* de uma bateria, notas à esquerda de um piano, contrabaixo de uma orquestra, etc). Por estes serem limites subjetivos, ou seja, não há valor fixo, eles são delimitados de acordo com a particularidade de cada caso a ser analisado. Estas frequências podem ser delimitadas também de acordo com comparação entre outras, por exemplo, a voz masculina geralmente é mais grave que a voz feminina (BRANDÃO, 2016).

Assim como as frequências, os seres humanos também possuem limites de volume sonoro, ou seja, abaixo de determinado limite inferior o som é inaudível e acima de um limite superior a amplitude sonora provoca sensação de dor (BRANDÃO, 2016).

O fenômeno sonoro pode ser entendido como uma onda mecânica longitudinal que se propaga através de qualquer fluido elástico, como citado no capítulo 2.1. A propagação está relacionada com densidade volumétrica do fluido (ρ) pois para fins de análise considera-se um tubo de comprimento infinito com um cilindro em movimento harmônico simples.

Em tese, existem infinitas frequências audíveis entre 20 e 20 000 Hz. Uma maneira consensual e comum de delimitá-las em subgrupos é utilizando bandas de oitavas que proporcionam identificar e manipular determinadas frequências em níveis. Como por exemplo, para cinco bandas de oitava é possível dividi-las em 500Hz, 1000Hz, 2000Hz, 4000Hz e 16000Hz, ficando mais fácil de identificar e manipular as frequências em grupos, tendo valores mais resumidos. As frequências a serem delimitadas nas bandas de oitavas,

estão sujeitas a aplicações. Para utilização em instrumentos graves, por exemplo, são adotadas bandas de oitavas mais baixas, para instrumentos agudos, bandas de oitavas mais altas. Em estúdios profissionais de gravação é comum encontrar equalizadores gráficos com mais de 60 bandas de oitavas.

2.4. PROJETO ACÚSTICO, EQUAÇÕES E DIRETRIZES.

A perturbação provocada no sistema pelo cilindro não é detectada imediatamente por um ponto no tubo, ela se propaga no fluido com uma velocidade dada pela Equação 1 que é função de parâmetros, como temperatura e pressão, de acordo com Brandão, 2016. A relação da velocidade da onda sonora pode ser expressada desta maneira para sons de pequenas amplitudes, considerando o ar como um gás ideal

$$c^2 = (\gamma \times P_0) \div \rho \quad (1)$$

Onde,

c = velocidade da onda sonora (m/s)

γ = Razão dos calores específicos do meio em que a onda se propaga (adimensional)

P_0 = Pressão estática do meio (Pa)

ρ = Densidade estática do meio (kg/m³)

Para temperatura ambiente de 20°C, a velocidade do som aproximada é de $c_0 \approx 343 \text{ m/s}$.

O movimento harmônico simples é qualquer movimento que possa ser definido por uma função senoidal ou cossenoidal, desta forma, é possível calcular o tempo T_p necessário para que a função complete 1 ciclo como mostra a equação 2 (BRANDÃO, 2016):

$$Tp = \frac{1}{f} \quad (2)$$

Onde,

Tp = Período (s)

f = Frequência (Hz)

A frequência angular pode ser definida também como (BRANDÃO, 2016):

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{Tp} \quad (3)$$

Onde,

ω = Frequência angular do MHS [rad/s]

f = Frequência (Hz)

Tp = Período (s)

2.5. FUNDAMENTOS DA ONDAS SONORAS

Sabine, no início do Séc XX, foi o primeiro a deduzir que o tempo para que a energia sonora se reduza à milionésima parte da energia em regime estacionário era um parâmetro importante na caracterização acústica de uma sala. Esse parâmetro foi chamado então de “Tempo de Reverberação” (ou T_{60}). O parâmetro leva esse nome pois Sabine verificou que este é dos principais parâmetros no tratamento acústico de salas e é o tempo necessário para que um sinal sonoro tenha um decaimento de 60dB.

$$T_{60} = \frac{0.161 \cdot V}{S \alpha} \quad (4)$$

Onde,

V = Volume da sala (m^3)

$S\alpha$ = Quantidade de absorção presente no ambiente (m^2)

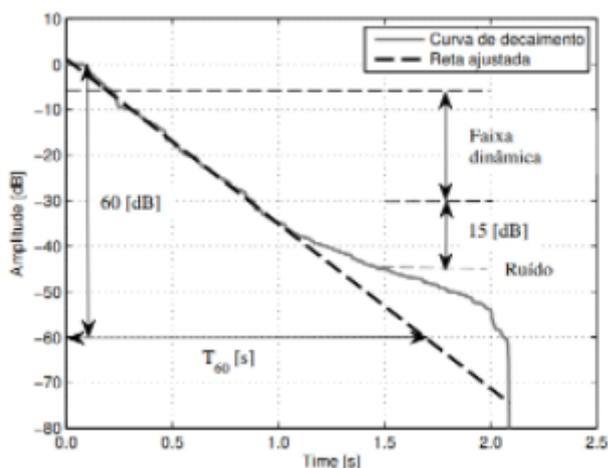
$$\alpha = \frac{1}{S} * \sum_i S_i * \alpha_i \quad (5)$$

Onde,

$S = \sum_i S_i$ É o somatório das áreas dos aparatos e absorvedores dentro da sala.

No projeto acústico de salas, Brandão (2016) deixa explícito a necessidade do conhecimento do T_{60} do ambiente em questão a ser analisado. Esta é uma variável que não possui um valor específico para aplicação, pois ela depende do tamanho e aplicação sonora da sala (gravação, teatro, orquestra de vozes, etc). Os defeitos graves devem ser evitados. Por defeitos graves entende-se ecos demasiadamente longos (sem levar em conta processamento eletrônico), reflexões de som ocasionadas pela baixa absorção pelas paredes do ambiente.

Figura 2 - Detalhe da medição do decaimento da pressão sonora (T_{60})



Fonte: BRANDÃO, 2016

Outros parâmetros subjetivos mencionados na obra de Brandão (2016) que julga ser importante a consideração são T_{20} e T_{30} que basicamente são similares ao T_{60} com a diferença em que o T_{60} mede o tempo de decaimento (NPS) para 60dB, como mostra a figura 2, os outros respectivamente para 20dB e 30dB.

De acordo com Rossing (2007 apud Brandão 2016), **Claridade** (C_{50}) e **Definição** (D_{50}) são parâmetros objetivos que estão relacionados à capacidade subjetiva de distinguir sons em sequência (“clareza” de um sinal sonoro). Quando uma sala apresenta um bom grau de clareza, a música tocada nela soa bem definida, com articulações sonoras límpidas e exatas, independentemente do andamento. Da mesma forma, um sinal de voz terá vocábulos bem-articulados. Assim, esses parâmetros estão relacionados à inteligibilidade da música (Claridade) e à inteligibilidade da fala (Definição). Isso está relacionado ao fato de que as primeiras reflexões, que chegam dentro de até 50 ou 80 [ms], tendem a ser integradas ao som direto pelo sistema auditivo. As figuras abaixo mostram as respectivas equações para cada parâmetro citado:

$$C_{50} = 10 \log \left(e^{+\frac{c_0 S_a}{4V} 0.05} - 1 \right) \quad (6)$$

Onde,

C_{50} = Claridade (adimensional)

c_0 = Velocidade da onda sonora no ar a temperatura de 20°C e 100 kPa

($c_0 \approx 343 \text{ m/s}$).

S_a = Quantidade de absorção presente no ambiente (m^2)

V = Volume da sala (m^3)

$$D_{50} = 1 - e^{-\frac{c_0 S_a}{4V} 0.05} \quad (7)$$

Onde,

D_{50} = Definição (adimensional)

c_0 = Velocidade da onda sonora no ar a temperatura de 20°C e 100 kPa

($c_0 \approx 343 \text{ m/s}$).

S_α = Quantidade de absorção presente no ambiente (m^2)

V = Volume da sala (m^3)

O tempo central também é uma medida do balanço entre a energia contida nas primeiras reflexões e a energia contida na cauda reverberante. Ele pode ser visto como o centro de gravidade da energia de uma resposta ao impulso. A vantagem desse parâmetro, em relação aos parâmetros Claridade (C_{50}) e Definição (D_{50}), é que ele não estabelece um limite abrupto entre as primeiras reflexões e a cauda reverberante (50 ms). Dessa forma, a definição do tempo central, com base na resposta ao impulso medida por um microfone omni direcional (que capta sons de todas as direções), é exemplificada pela equação 8.

$$t_s = \frac{4V}{c_0 S_\alpha} \quad (8)$$

Onde,

t_s = Tempo central (s)

c_0 = Velocidade da onda sonora no ar a temperatura de 20°C e 100 kPa

($c_0 \approx 343 \text{ m/s}$).

S_α = Quantidade de absorção presente no ambiente (m^2)

V = Volume da sala (m^3)

Brandão (2016) denota que um valor pequeno de t_s corresponde a uma resposta ao impulso cuja energia é concentrada nas primeiras reflexões, o que, por consequência, é

associado a valores altos de Claridade e Definição. Um valor elevado de t_s (s) corresponde a uma resposta com bastante reverberação, já que o centro de gravidade da resposta ao impulso está contido na região da cauda reverberante.

O fator de força (G) é uma medida da influência da sala no loudness (volume sonoro ou intensidade percebida do som). Subjetivamente o Fator de força está associado ao fato de a sala possuir ou não um campo reverberante que fornece suporte ao som direto da fonte sonora. Uma forma que Brandão (2016) menciona de medir esse parâmetro é medir a razão entre as energias contida na resposta ao impulso medida em uma sala com uma fonte e um microfone omnidirecional e a energia da resposta ao impulso provocada pela mesma fonte e captada pelo mesmo microfone em campo livre a 10 (m) da fonte. Assim, o Fator de força, em (dB), é definido pela equação 9.

$$G = 10 \log \left(\frac{T_{60}}{V} \right) + 45 \quad (9)$$

Onde,

T_{60} = Tempo de reverberação (s)

V = Volume (m³)

Note que um aumento do do tempo de reverberação (T_{60}), mantendo-se o volume da sala constante, implica em um aumento do loudness experimentado na sala, o que se explica pela maior quantidade de reverberação (mais energia acústica retorna a sala pelas reflexões e a sala fornece suporte ao som direto gerado pela fonte). Um aumento do volume da sala, mantendo o tempo de reverberação constante, leva a uma diminuição do loudness, já que as paredes tendem a estar mais distantes e a sala tem a mesma quantidade de absorção ($S\alpha$).

O Índice de Transmissão de Fala (STI) é uma parâmetro que descreve a inteligibilidade do discurso está relacionado diretamente com o T_{60} e o ruído de fundo. O ruído de fundo, por sua vez, é um parâmetro subjetivo que é verificado através de um sistema de som eletrônico e usualmente é medido da seguinte forma: é gerado um *white noise* pelo aparato de amplificação de som e, com a utilização de um sonómetro, pode se medir se este ruído de fundo refletido pelas paredes do ambiente está cancelando alguma frequência

importante para a inteligibilidade da fala. Assim, Serrano classifica o Índice de Transmissão de Fala (STI) de acordo com a tabela 1.

Tabela 1 - STI relacionado a qualidade do discurso

STI	
Valores	Qualidade do discurso
0,00 a 0,030	Ruim
0,30 a 0,45	Pobre
0,45 a 0,60	Razoável
0,60 a 0,75	Bom
0,75 a 1,00	Excelente

Fonte: SERRANO, 2016

Existem centenas de outros parâmetros na análise acústica de um ambiente, dentre estes alguns estão relacionados a performance musical e timbragem para canto erudito e fogem do escopo deste trabalho. Para futuros trabalhos dentro do auditório do IFSC - Lages, pode-se estudar e aplicar melhorias com a ajuda destes parâmetros, pensando nas apresentações da orquestra de violões do IFSC, por exemplo.

2.6. MATERIAIS E ACÚSTICA

Ambientes fechados onde há produção e propagação podem sofrer diretamente com fenômenos relacionados à reflexão do som pela reincidência do mesmo, isto acontece devido a baixa capacidade de absorção dos materiais utilizados na construção da sala (ALMEIDA, 2010).

Brandão (2016) explica que o isolamento sonoro de uma parede (ou partição) é função de sua massa, rigidez e amortecimento. Para uma parede simples, quanto maior a massa, maior tende a ser sua capacidade de isolamento acústico. A capacidade de isolamento é medida pela “Perda de Transmissão” (PT ou *Transmission Loss*, TL, em inglês) dada em dB.

Em geral, pode-se dizer com algum grau de aproximação que dobrar a densidade superficial de uma parede faz com que o PT aumente de 6.0 (dB). Pode-se utilizar um material como uma espuma ou lã de rocha com fins de isolamento sonoro? Em primeiro lugar podemos pensar em construir uma parede dupla, separada por um espaço de ar. Nesse caso, o uso da espuma ou lã de rocha para preencher o espaço de ar adiciona muito pouca massa ao elemento construtivo. No entanto, o material fono absorvente colocado entre as paredes ajuda a atenuar as ressonâncias acústicas formadas nesse espaço e, portanto, ajuda no desempenho da absorção do som pelas paredes.

A espuma em não tem uma densidade superficial significativa. Usá-la sozinha para separar dois ambientes torna-se ineficaz no isolamento sonoro. O coeficiente de absorção do material fonoabsorvente (α_s) não deve ser confundido com a PT ou usado para mensurar a capacidade de isolamento sonoro do elemento construtivo. A segunda forma de aplicação do material fonoabsorvente é colocá-lo em salas para o controle da reverberação. Como exemplo, imagine duas salas (1 e 2), onde se tem campo difuso. As salas são separadas por uma parede de área S_w , a qual desejamos medir a PT. Na sala 1 uma fonte sonora emite um ruído estacionário que deve ter a pressão sonora medida nas salas 1 e 2.

$$PT = L1 - L2 + 10 \log (S_w) - 10 \log (S_{\alpha 2}) \quad (10)$$

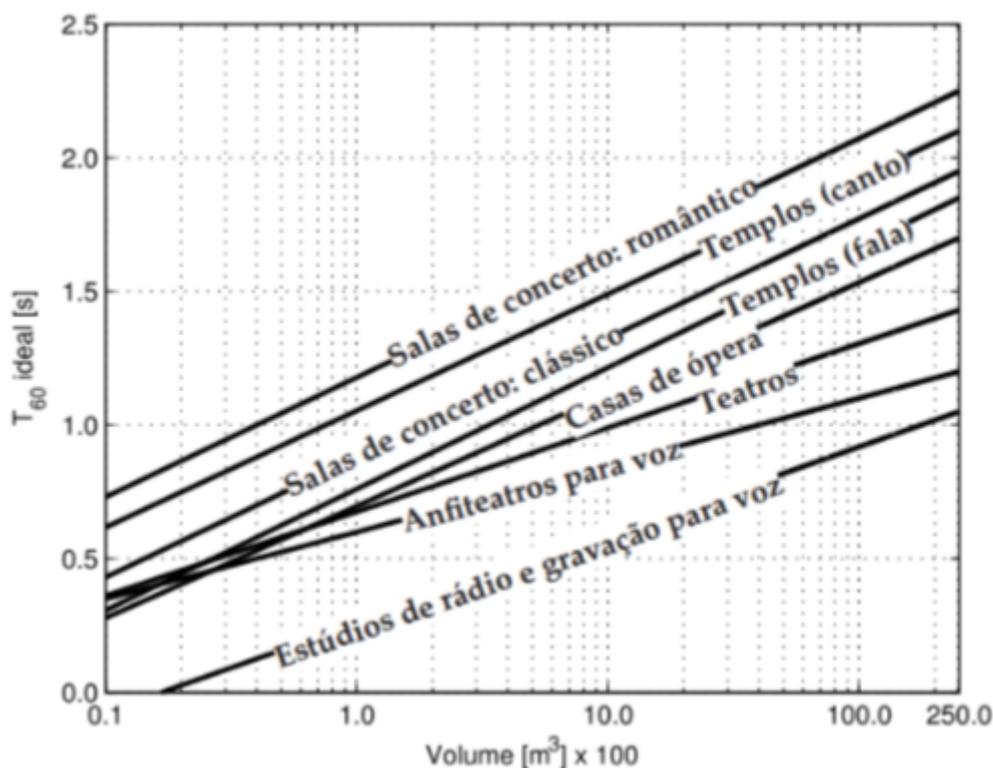
Onde,

$L1$ e $L2$ são as médias dos NPS (pressão sonora) medidas nas respectivas salas 1 e 2. O termo S_w é a quantidade de absorção sonora da sala 1 e o termo $S_{\alpha 2}$ é a quantidade de absorção sonora da sala 2 .

2.7. DIRETRIZES

A figura 3 explica esquematicamente os principais defeitos acústicos relacionados entre volume e T_{60} :

Figura 3 - tempo de reverberação ótimo



Fonte: BRANDÃO, 2016

Há muitos tipos de salas onde a fala é o principal som no ambiente que intrinsecamente traz consigo alguma mensagem que deve ser entendida pelos ouvintes que ali estão. Dentre elas destacam-se: auditórios, igrejas, salas de concerto, estúdios de gravação, sala de conferência.

Com base nos exemplos citados acima, Brandão (2016) mostra que há alguma diferença demasiada no que diz respeito ao número principal de fontes geradoras de sons. Como o intuito deste trabalho é desenvolver um projeto de otimização acústica para o auditório do IFSC - Lages, dá-se enfoque a voz principal onde os parâmetros objetivos mais relevantes são inteligibilidade da voz e o volume. Dentre estes parâmetros descritos, podemos citar: tempos de reverberação (T_{20} , T_{30} , T_{60}), Claridade (C_{50}), Definição (D_{50}), Tempo central (t_s). Destaca-se um fator importante relacionado a T_{20} , T_{30} , T_{60} que diretamente indicam parâmetros quantificados sobre a cauda reverberante.

Uma cauda reverberante demasiadamente longa prejudica a inteligibilidade da voz. Deste modo, é de suma importância que haja atenção no isolamento acústico, quanto no tratamento sonoro, que visa controlar o tempo de reverberação.

Na média, pode-se afirmar, de acordo com Brandão, que as frequências mais importantes para se controlar no tratamento acústico, onde o principal foco é enfatizar a voz humana, estão entre 85 Hz a 8500 Hz. Se tratando a voz exclusivamente gerada pelo aparelho fonador de cada indivíduo, estes valores não são fixos, há alguma variação para cada classificação vocal de indivíduos, bem como, o gênero (masculino e feminino) interfere neste aspecto. O aparelho fonador é todo o conjunto biológico do indivíduo formado por diafragma, laringe, faringe, nariz, boca, língua, lábios, cavidade nasal e craniana que são responsáveis por gerar e amplificar o som da voz (PACHECO, et al 2006).

Numa sala de aula, onde a principal fonte de voz é a do professor(a) e este normalmente localiza-se à frente da sala, e os ouvintes distribuídos ao longo dela, algumas vezes, organizados em uma roda. Frequentemente é necessário a utilização de recursos eletrônicos para amplificação e melhor transmissão da mensagem intrínseca na fala do professor, bem como a transmissão de algum recurso audiovisual (apresentações e vídeos). A faixa de reprodução gerada por tais recursos pode ser desprezada no projeto acústico de salas, prezando pela otimização da inteligibilidade da voz. Todavia, é importante ressaltar que na utilização de aparatos eletrônicos (caixas de som, *mixers*, circuitos de potência e compressores) tome-se atenção para que os sons gerados pela fonte não excitem baixas frequências (zonas aproximadas entre 100 Hz e 80Hz) na sala, o que pode ser facilmente obtido na utilização de recursos como um *mixer*, por exemplo, como um *High-Pass Filter* (filtro Passa-Alta, por alguns autores) (BRANDÃO, 2016).

2.8. IMPORTÂNCIA DA ACÚSTICA EM AMBIENTES DE ENSINO

Há muito tempo a qualidade acústica de um determinado ambiente fechado tem sido vinculada ao desempenho do aluno em métricas estudantis nos EUA. De acordo com Brandão (2016) apud Choi et al (2014), a qualidade de um ambiente estudantil (luminosa, térmica, acústica) tem impacto direto no desempenho dos alunos, do curso e na aceitação.

A qualidade acústica das salas de aula no ensino médio se mostrou relacionada com o desempenho dos alunos através de alguns testes (RONSSE, 2013). a questão de idade também

influencia na necessidade de uma sala de aula tratada acusticamente, pois Bradley e Sato apud Brandão 2016 demonstraram em um estudo realizado no ano de 2008 que alunos mais jovens de uma escola do ensino fundamental no Canadá tem mais dificuldades de entender uma palavra falada do que outros, então denota-se a importância do tratamento acústico para ambientes de ensino.

No Brasil, no entanto, Brandão (2016) cita que é relativamente raro encontrar uma sala de aula típica com boas condições acústicas. O estudo Caracterização das Condições Acústicas de Salas de Aula Destinadas ao Ensino da Música na Educação Básica Brasileira, realizado em Santa Maria-RS (Gaida, 2012), demonstrou que todas as salas medidas apresentam STI inferior a 0.6, o que indica que as salas têm qualidade acústica razoável. O estudo foi realizado sem considerar o ruído de fundo (somente a reverberação foi analisada), o que ainda indica que, em aplicações realistas, o STI das salas deve diminuir ainda mais. Considerando possíveis usos de pessoas com deficiência auditiva, parece imperativo que se discuta e invista nessa questão no Brasil.

Existem muitas maneiras pelas quais os indivíduos descrevem sua experiência auditiva em uma sala, incluindo: “Esta sala é muito clara”, “Esta sala é muito viva”, “Esta sala é muito seca”, “O som é confuso”, “O som é quente”, “O som é aveludado”, “O som está perto” “O som está distante”, etc. Claramente, esse tipo de descrição toma forma por meio de adjetivos. Além disso, existe também um fator subjetivo, que está relacionado ao gosto e treinamento auditivo de cada indivíduo, e também um fator relacionado à linguagem, já que a percepção das palavras varia de idioma para idioma. É essencial entender, no entanto, que um amplo universo amostral de indivíduos tende a descrever descrições justas de maneira semelhante; portanto, os indivíduos tendem a interpretar as percepções auditivas de maneira semelhante. Isso vem do fato de que o sistema auditivo-cognitivo dos seres humanos, embora a rigor diferente de pessoa pra pessoa, apresenta um mecanismo de funcionamento similar. Desta maneira os parâmetros objetivos descritos neste trabalho serão fundamentais para o entendimento da qualidade acústica do auditório, principalmente, alguns dos parâmetros mais importantes que estão relacionados com o entendimento da fala (Definição e Tempo de Reverberação). Desta maneira, outros parâmetros importantes para inteligibilidade de outras atividades, como música por exemplo, não serão abordados na metodologia deste trabalho, como Fator de Força, Tempo Central e Definição.

Utilizando a acústica geométrica para simular o auditório é uma proposta que apresenta a vantagem de levar em conta a geometria da sala e cada software utilizado possui

suas vantagens, desvantagens e modelos matemáticos distintos uns dos outros. É evidente que a utilização de software para simulação da acústica geométrica é uma aproximação da realidade. É impossível cobrir todas as peculiaridades de cada forma de implementação e, mesmo assim, conseguir mensurar todas as vantagens e desvantagens associadas, ao passo que, a maneira mais precisa de se medir parâmetros acústicos ainda é com a utilização de equipamentos físicos.

Os parâmetros objetivos aos quais terão ênfase na seção a seguir serão o Tempo de Reverberação e a Definição devido às suas propriedades de interferir nas características de qualidade auditiva do discurso falado. Também será observado se a forma construtiva do auditório refletiu um planejamento acústico em sua fase conceitual.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

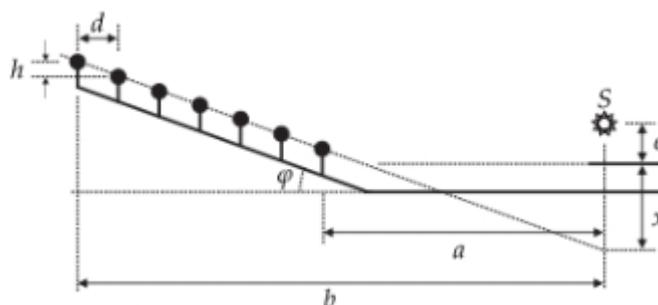
Foi verificado se as características construtivas do auditório atendem o que recomenda a ABNT NBR 12 179. Em primeiro momento foi realizado uma simulação teste com uma sala vazia utilizando as dimensões x, y e z máximas do auditório com a finalidade de verificar a funcionalidade do I Simpa. Em seguida, foi realizada a modelagem 3D completa baseada nas medidas do auditório para realizar a simulação numérica dentro do I Simpa. Por recomendação do fabricante do software de análise numérica, I Simpa, foi utilizado o software Sketchup 2021 para modelagem 3D do auditório. Posteriormente, após a modelagem, foi importado o projeto 3D do auditório para o I Simpa e neste software é onde foram verificadas as intensidades dos parâmetros idealizados como importantes para inteligibilidade da fala que estão atualmente presente no auditório do IFSC Campus Lages e, posteriormente, sugerindo formas de melhorias a fim de proporcionar aumento do conforto acústico do ambiente.

3.1. VERIFICAÇÃO DAS ORIENTAÇÕES DE PROJETO

O arranjo do auditório e distribuição de assentos visa manter a menor distância possível entre fonte sonora (orador) e ouvintes, isso torna a construção do local mais adequada e garante um melhor aproveitamento da área. Dados, aspectos visuais, recomenda-se que o ângulo de inclusão máximo seja de 125° (BRANDÃO, 2016), otimizando a visualização tanto do orador quanto da tela de projeções. Outro requerimento comum em demais tipos de auditório (teatro, salas de concerto, cinema) é que o piso seja inclinado devido a fatores acústicos e visuais.

A figura 4 denota um esquema de como calcular inclinação do piso. A recomendação é que a distância vertical entre duas fileiras h esteja entre 8 e 12 cm.

Figura 4 - Inclinação do piso em uma sala



Fonte: BRANDÃO, 2016

Esta distância irá garantir boa visibilidade e facilita a audição do som direto antes das reflexões, pois a cabeça da pessoa à frente funciona como uma barreira acústica. De acordo com Rossing, apud Brandão (2016) o ângulo de inclusão ideal é dado pela equação 11.

$$\tan(\phi) = \frac{hb}{da} - \frac{e}{a} \quad (11)$$

Onde,

h = Distância vertical entre as linhas de visão de duas fileiras em sequência (m)

b = Distância entre a última fileira e o palco (m)

d = Distância entre as fileiras (m)

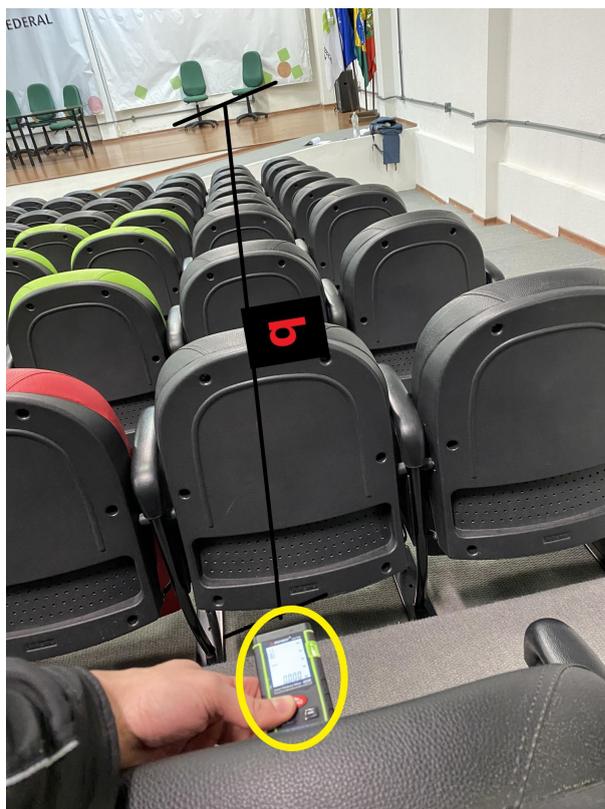
a = Distância entre fonte e primeira fileira (m)

e = Altura da fonte em relação ao palco (m)

ϕ = Ângulo de inclusão ($^{\circ}$)

Para se obter medidas foi utilizada uma trena digital SNDWAY SW-T40 resolução 0,001 metros e foi utilizado o Google planilhas para realização dos cálculos automatizados. Na figura 5 é possível visualizar como foi obtida a dimensão b , por exemplo, utilizando na trena digital a função de realizar a medição a partir da base da trena. Para todas as dimensões, foram tomadas cinco medidas e utilizada a média destas cinco.

Figura 5 - Dimensão b do auditório

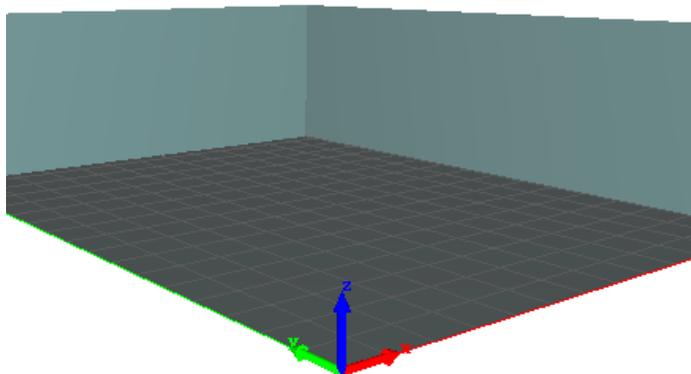


Fonte: próprio autor

3.2. MODELO TESTE 3D E SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Em primeiro momento o auditório foi modelado de modo simples para ser refinado posteriormente adicionando mais elementos. Foi criado um modelo de bloco retangular de dimensões (17,54m x 13,55m x 4,70m) utilizando o software Sketchup e a planta baixa do auditório. O modelo foi importado para o software I Simpa como mostra a figura 6. Foi modelada uma sala retangular sem portas, janelas, móveis, palco, degraus com o objetivo de simplificar a análise.

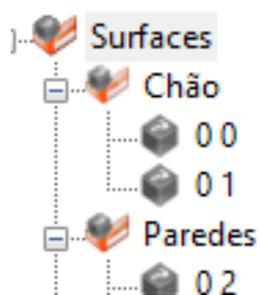
Figura 6 - Modelo de sala retangular importado no I Simpa



Fonte: O próprio autor.

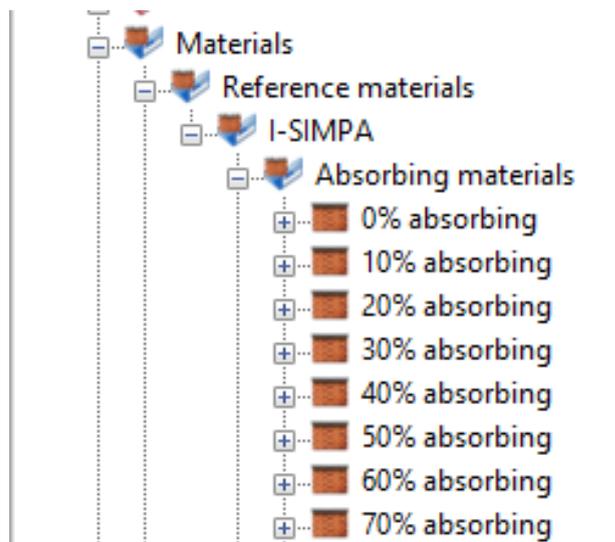
Na figura 7 indica que foram definidas as malhas de cada superfície que possui material diferente (parede, chão e teto) pois é necessário definir um percentual de absorção de cada material. O percentual pode variar de 0 a 100% indicando quanta energia o material absorve e transmite. Este valor representa a média aritmética dos coeficientes de absorção obtidos nas frequências de 250, 500, 1.000 e 2.000Hz. (BRANDÃO, 2016).

Figura 7 - Definição das malhas



Fonte: O próprio autor.

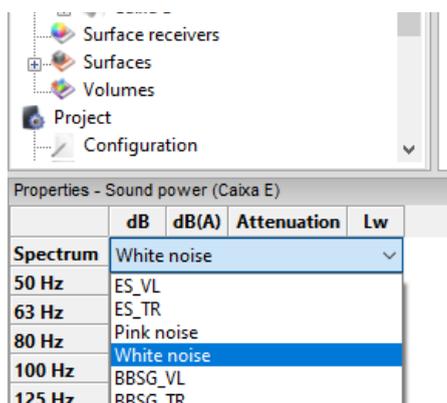
Figura 8 - Tabela de materiais



Fonte: O próprio autor.

Como na figura 9 foram definidas as fontes emissoras do local como fontes de ruído branco (*white noise*), uma vez que esse tipo de ruído oscila dentro de todos o espectro audível de frequências proporcionando avaliar como o ambiente comporta-se com a absorção e propagação de faixas de frequências.

Figura 9 - Fontes emissoras

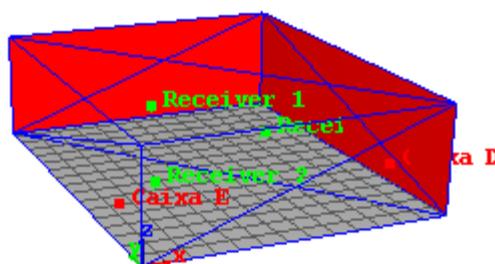


Fonte: O próprio autor.

Ao fim do processo, foi adicionada uma fonte receptora em um local aleatório da sala que irá indicar numericamente, através de uma planilha do excel gerada pelo I Simpa os

valores dos parâmetros acústicos da sala que o software mediu utilizando o princípio SPPS (do francês "*Simulation de la Propagation de Particules Sonores*") que, basicamente, baseia-se no rastreamento de partículas sonoras, carregando uma quantidade de energia quando emitida por uma fonte sonora, dentro de um domínio 3D, como mostra a figura 10.

Figura 10 - Sala pronta para simulação virtual



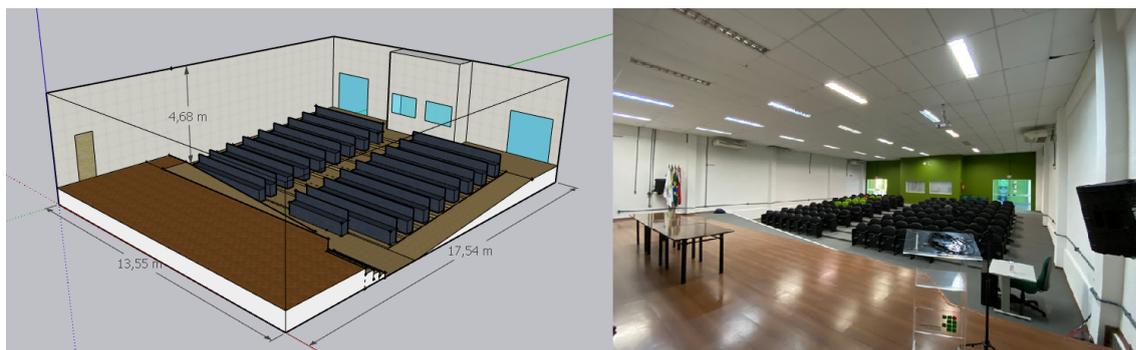
Fonte: O próprio autor.

3.3. MODELO FINAL 3D E SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Após diversos modelos de teste, foi estabelecido um modelo 3D final do auditório compatível com o I Simpa utilizando especificações da planta baixa e memorial descritivo fornecidos pela diretoria do Campus Lages. De acordo com a conveniência de aplicação, foi utilizado o software Sketchup 2021 para modelagem do auditório. Para as medidas que não estavam disponíveis na planta baixa, foi utilizada a trena digital. Para cada dimensão, foram realizadas 5 medidas e utilizada a média destas para elaboração do modelo 3D e resultados mais próximos da realidade.

Na figura 11 é exibido o modelo final do auditório em perspectiva isométrica com o teto, parede esquerda e frontal ocultas para visualização do interior.

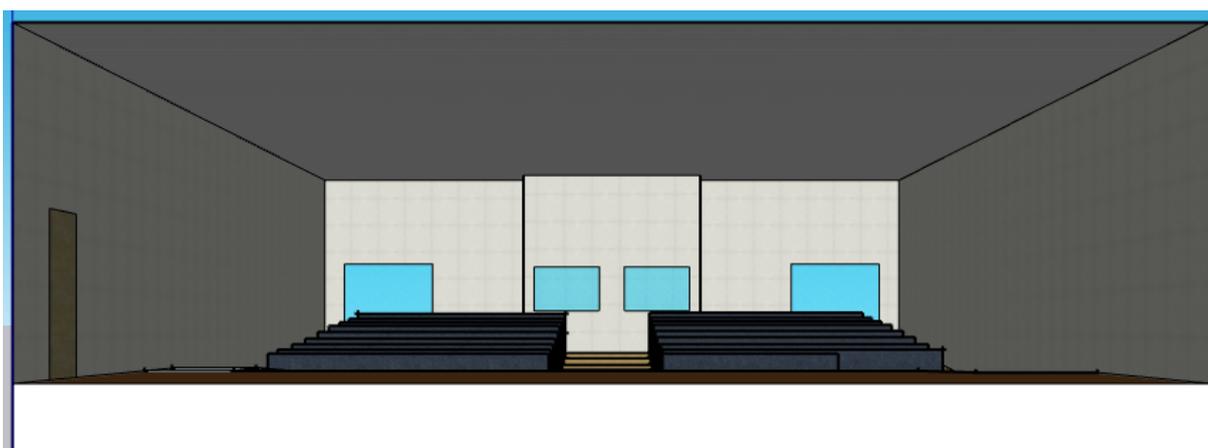
Figura 11 - Vista isométrica do modelo 3D do auditório do IFSC - Lages



Fonte: O próprio autor

Na figura 12 é apresentada uma visão frontal do auditório com a parede frontal oculta, para melhor visualização do leitor

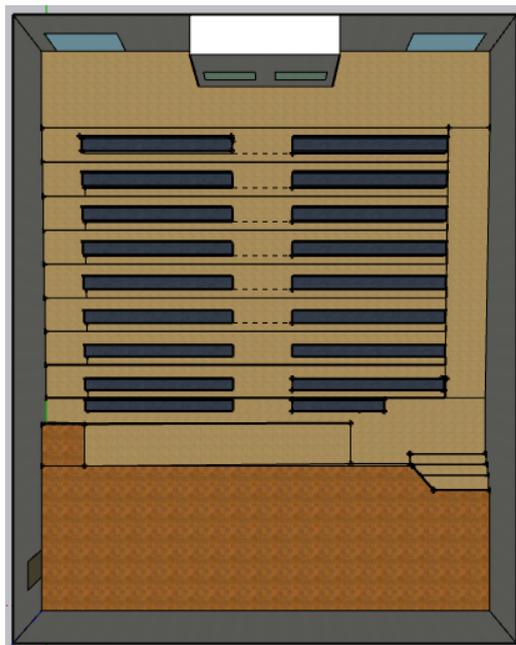
Figura 12 - Vista frontal do modelo 3D do auditório do IFSC - Lages



Fonte: O próprio autor

Na figura 13 é apresentada a vista superior do modelo 3D do auditório. Na etapa final de modelagem foram definidos todos os materiais para cada elemento do desenho com a finalidade de facilitar a integração entre o modelo 3D e o I Simpa. Os bancos foram elaborados como elementos únicos, porém, seguindo a dimensão real dos bancos do auditório.

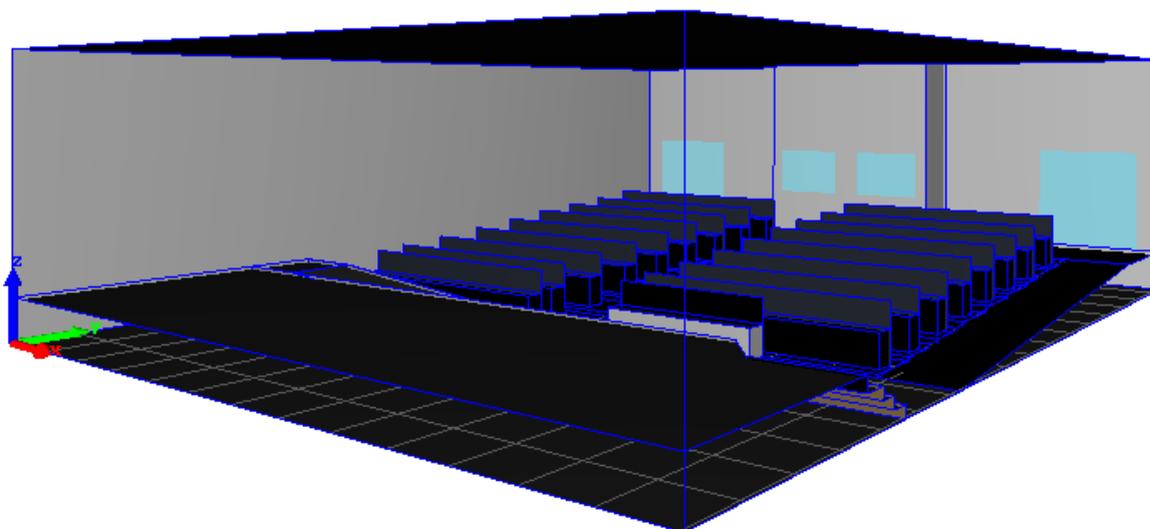
Figura 13 - Vista superior do modelo 3D do auditório do IFSC - Lages



Fonte: O próprio autor.

Diante do modelo 3D concluído com os materiais estabelecidos, o desenho foi exportado para o formato .3DS como recomenda a documentação do I Simpa. No I Simpa, foi criada uma nova cena e importado o modelo 3D do auditório, que após a tetraedralização das malhas, é apresentada como mostra a figura 14. No processo de tetraedrealização todas as superfícies do modelo são definidas como malhas utilizando o método SPPS, ou método de partículas sonoras. É possível modelar muitos fenômenos acústicos através do conceito de partículas sonoras como absorção, transmissão, reflexão e difusão em superfícies, espalhamento por encaixe de objetos e efeitos meteorológicos. O princípio da simulação depende do rastreamento das partículas sonoras, transportando uma quantidade de energia emitida de uma fonte sonora, dentro de um domínio 3D. Cada partícula se propaga ao longo de uma linha reta entre dois intervalos de tempo (toda a trajetória pode ser curva), até a colisão com um objeto. A cada colisão, as partículas sonoras podem ser absorvidas, refletidas, espalhadas, difusas, transmitidas, dependendo da natureza do objeto (PICAUT *et al*, 2012).

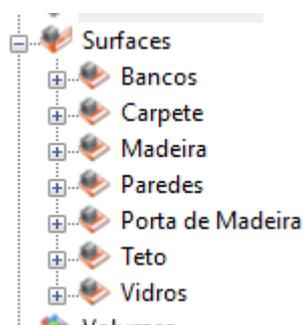
Figura 14 - Modelo 3D do auditório tetraedralizado e com as malhas definidas no I Simpa



Fonte: O próprio autor

A partir do modelo é possível estabelecer grupos para as malhas reconhecidas pelo software para que posteriormente seja possível definir os coeficientes de absorção da cada material. Deste modo, utilizando a função *surface selection mode* foram selecionadas e separadas as malhas correspondentes aos bancos, carpete, madeira do palco, paredes, porta de madeira (ao lado esquerdo), teto e vidros respectivamente para definição dos coeficientes de absorção e espalhamento de cada material de acordo com a NBR 12 179. A figura 15 mostra a árvore de malhas já separada de acordo com cada superfície.

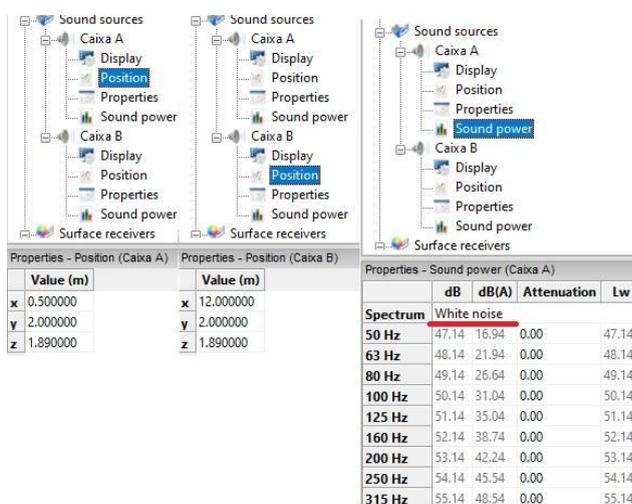
Figura 15 - Árvore de malhas



Fonte: O próprio autor

São definidas as fontes sonoras (caixas A e B) as quais estão presentes no auditório atualmente. É estabelecido seu posicionamento de acordo com o mensurado no local físico com o auxílio da trena digital e definido que o tipo de sinal sonoro a ser emitido pelas fontes é o ruído branco, pois este irá varrer todo o espectro de frequências audíveis possibilitando resultados mais assertivos. A figura 16 mostra o posicionamento estabelecido para cada fonte e as características de ruídos que foram definidas.

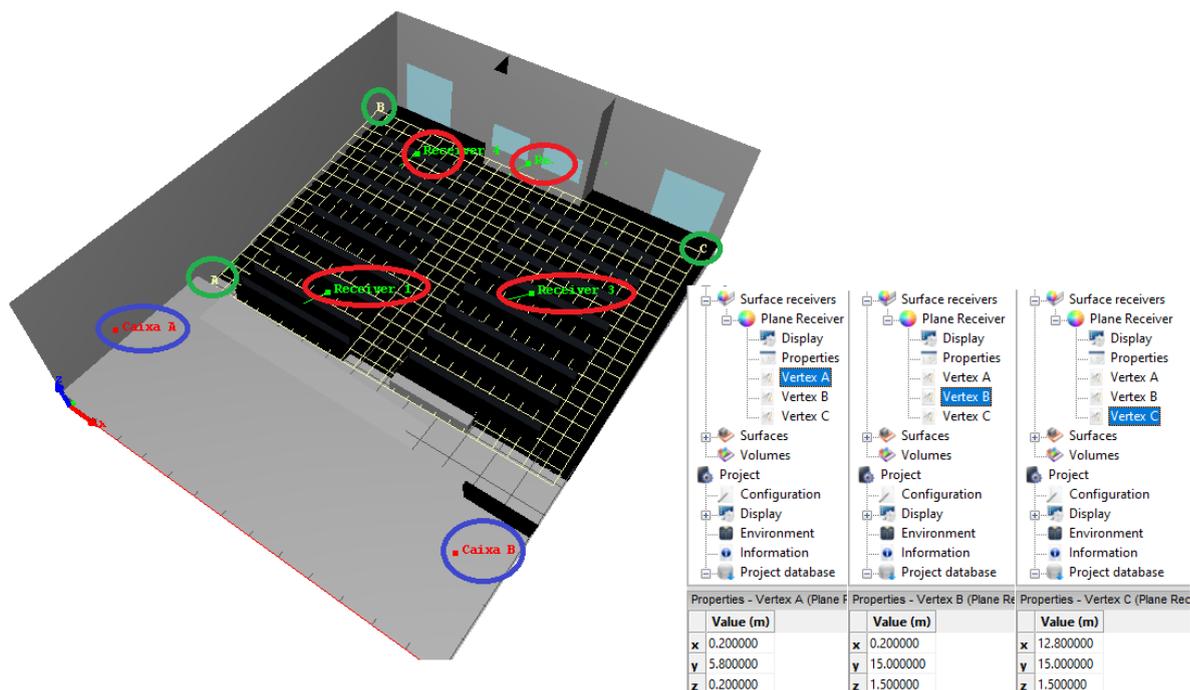
Figura 16 - Características das fontes sonoras



Fonte: O próprio autor

Para que fosse possível identificar os parâmetros acústicos presentes no ambiente é necessário estabelecer fontes receptoras no local onde a audiência do teatro estará localizada. Neste projeto optou-se pela colocação de quatro fontes receptoras em locais aleatórios. É recomendado que adicionalmente às fontes receptoras seja adicionado um plano receptor. Os 3 pontos que definem o plano receptor (Vertex A, Vertex B, Vertex C) devem então ser colocados ao nível do local principal da audiência. A figura 17 indica as fontes receptoras, o plano receptor e as coordenadas de cada vertex, bem como, as fontes sonoras (caixas A e B) já posicionadas que foram citadas anteriormente.

Figura 17 - Modelo 3D no I Simpa com fontes, receptores e plano receptor



Fonte: O próprio autor.

Na aba *Calculation*, seguindo a recomendação das instruções do I Simpa, foram limitadas as bandas de oitavas por fonte entre 125 e 4 000 Hz, o que não impactou nos resultados pois a NBR 12 179 considera apenas o nível de reverberação em 500 Hz. Os resultados obtidos com a análise são mostrados no próximo capítulo.

4 RESULTADOS

No auditório a atividade mais recorrente é a oratória e em primeiro lugar é necessário se controlar o volume da sala. Segundo Long *apud* Brandão (2016), o volume permitido a um orador médio que fala sem o auxílio um sistema eletrônico de amplificação de voz é de 3 000 m³. O T60 ideal deve ser obtido de acordo com Brandão (2016), bem como, em acordo com a NBR 12.179 (ABNT, 1992), esse valor é inadequado para espaços maiores de 1000m³ que desempenha a função de auditório. Ambas sugerem que esse tempo seja de aproximadamente 0,8 segundos. A NBR 12 179 especifica que este tempo de 0,8 segundos deve ser para a frequência em 500 Hz.

Considerando os parâmetros obtidos através da simulação indicados na figura 18, o tempo de reverberação para decaimento em 60dB (T_{60}) para 500Hz desta sala é de 5,54s, estando acima da curva ideal para um auditório.

Figura 18 - Sala pronta para simulação virtual

Sound level (dB)	Sound level (dBA)	C-50 (dB)	C-80 (dB)	D-50 (%)	Ts (ms)	RT-15 (s)	RT-30 (s)	RT-60 (s)	EDT (s)	S
39.7	9.5	-5.2	-4.0	23.6	465.2	6.78	5.92	5.92	8.97	
40.6	14.4	-5.1	-3.8	24.3	446.5	6.66	5.72	5.72	8.61	
41.5	19.0	-5.3	-4.0	23.4	455.1	6.65	5.72	5.72	8.57	
42.6	23.5	-5.2	-3.9	23.7	450.6	6.71	5.73	5.73	8.53	
43.5	27.4	-5.5	-4.2	22.3	453.0	6.68	5.78	5.78	8.41	
44.6	31.2	-5.2	-3.9	23.9	442.4	6.94	5.81	5.81	8.58	
45.5	34.6	-5.0	-3.7	24.8	437.6	6.64	5.41	5.41	8.37	
46.5	37.9	-4.9	-3.6	24.8	430.7	6.72	5.63	5.63	8.31	
47.4	40.8	-5.1	-3.7	24.0	424.7	6.75	5.93	5.93	8.16	
48.3	43.5	-5.0	-3.6	24.7	413.9	6.68	5.77	5.77	7.79	
49.3	46.1	-4.8	-3.5	25.2	415.5	7.12	6.07	6.07	7.97	
50.2	48.3	-5.0	-3.5	24.8	394.8	6.49	5.33	5.33	7.28	
51.1	50.3	-4.7	-3.3	26.1	394.6	6.86	5.82	5.82	7.43	
51.9	51.9	-4.5	-3.2	26.9	384.1	6.70	5.80	5.80	7.35	
52.7	53.3	-4.5	-3.0	26.8	362.0	6.73	5.58	5.58	6.65	
53.7	54.7	-4.4	-2.9	27.3	333.0	6.50	5.46	5.46	6.04	
54.4	55.6	-3.9	-2.5	29.9	312.4	6.26	NaN	NaN	5.49	
55.0	56.3	-3.5	-2.0	31.7	275.2	5.65	4.75	NaN	4.90	
55.4	56.6	-2.8	-1.2	35.7	225.6	5.40	4.61	NaN	3.69	
55.8	56.8	-1.9	-0.3	40.6	173.5	4.11	NaN	NaN	2.59	
56.0	56.5	-1.0	0.8	46.2	127.1	2.33	2.85	NaN	1.82	
56.1	56.0	0.3	2.2	53.8	101.1	1.86	2.25	NaN	1.44	
55.9	54.8	2.1	4.3	65.3	72.2	1.22	NaN	NaN	0.97	
55.6	53.1	3.6	6.2	73.0	55.8	0.85	NaN	NaN	0.69	
55.5	51.3	5.5	8.5	81.4	45.9	0.72	NaN	NaN	0.53	
54.8	48.1	8.4	12.4	90.5	34.0	0.47	NaN	NaN	0.32	
54.1	44.8	11.7	19.2	95.5	28.9	0.23	NaN	NaN	0.24	
67.0	66.3	-0.3	1.2	50.1	191.7	6.63	5.47	5.47	3.56	
		-2.2	-0.4	38.5	302.1	5.06	NaN	NaN	5.55	

Fonte: O próprio autor.

O *Sound level* que é mostrado na primeira coluna é o padrão de pressão sonora de cada frequência para o *white noise* dado pelo próprio I Simpa. Os valores são modificados se for selecionado outro tipo de fonte sonora, como por exemplo o *pink noise* (utilizado para emular ruído de equipamentos industriais).

Ao analisar o resultado, nota-se que o modelo de sala elaborado que é mostrado na Figura 11, não atende às especificações do livro Acústica de Salas, projeto e modelagem e da norma NBR 12.179. O T_{60} da sala é tão acima do recomendado, pois esta é uma sala retangular e vazia de aproximadamente 1117,035 m³, de superfícies com baixo coeficiente de absorção sonora que proporcionam grande número de reflexões das ondas sonoras. Se houvesse uma palestra, por exemplo, neste ambiente, o Índice de Transmissão de Fala (STI) estaria classificado como ruim, como classificado na tabela 1.

4.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

A medição do tempo de reverberação T_{60} , ou RT_{60} no jargão do I Simpa, com o auditório completamente ocupado, nos quatro pontos diferentes sendo cada ponto representado por uma fonte receptora, é apresentada na tabela 2 junto a média do RT_{60} . Foi utilizado uma tabela de materiais do I Simpa que considera o coeficiente de absorção da poltrona mais o de uma pessoa sentada sobre ela para realização dos cálculos. O tempo de reverberação médio para a frequência de 500 Hz é de 3,45 segundos. De acordo com a NBR 12.179 (ABNT,1992), esse valor é inadequado para um volume de 987,74 m³ que desempenham a função de auditório para oratórias. A norma sugere que esse tempo fique em torno de 0,8 segundo em 500 Hz, o que denota que o tempo de reverberação do auditório ultrapassa mais de três vezes o valor recomendado.

Tabela 2 - Tempo de reverberação do auditório

Frequência Hz	Tempo no receptor 1 (s)	Tempo no receptor 2 (s)	Tempo no receptor 3 (s)	Tempo no receptor 4 (s)	Média (s)
500	2,96	3,59	3,54	3,70	3,45

Fonte: O próprio autor.

Se comparado com os resultados obtidos neste trabalho com a Proposta de adequação acústica em auditório de uso múltiplo de Da Costa (2019) foram encontrados resultados similares. Viveiros apud por Duarte (2007) em países tropicais como o Brasil há certa carência de estudos de acústica, levando em conta o seu aspecto arquitetônico, que geralmente, apresentam aberturas um aspecto desfavorável para um bom isolamento sonoro. Os vãos, advém dos fechamentos da edificação, que proporcionam mais facilmente a transmissão de sons externos para o interior da instalação.

Uma alta reverberação pode ser comprovada no auditório através da análise. De acordo com Barron (1993) citado por Moscati (2013) citado por Da Costa (2019), o intervalo de duração durante a fala das vogais é maior que a das consoantes e por conta disso, a compreensão ou inteligibilidade da fala diminui em ambientes que apresentem longo tempo de reverberação. Este fenômeno acontece pelo som das vogais ser mascarado pelo som das consoantes. Diante dos aspectos analisados, verifica-se que a inteligibilidade da fala no auditório está sendo afetada, em decorrência do tempo de reverberação encontrado ser muito acima do tempo ótimo sugerido pela norma NBR 12 179.

Foi realizado um segundo teste utilizando os coeficientes de absorção de poltronas da NBR 12 179 desconsiderando o coeficiente de absorção das pessoas, ou seja, considerando o auditório vazio. A diferença obtida neste resultado, em comparação com o auditório lotado, foi de um aumento de 7% no tempo de reverberação. Para conclusão das análises foi considerado o auditório com todas as poltronas lotadas.

4.2. DEFINIÇÃO (D50) E CLARIDADE (C50)

Definição é a razão entre a energia inicial e a energia total (ISO 3382-1, 2009). De acordo com Rossing (2007) citado por Brandão (2016) Claridade e Definição são parâmetros objetivos relacionados diretamente à capacidade psicoacústica subjetiva de distinguir sons em sequência (clareza de um sinal sonoro). Quando uma sala apresenta um bom grau de clareza, a música tocada nela soará bem definida, com articulações sonoras límpidas e exatas, independentemente do andamento. Da mesma forma, é possível relacionar estes parâmetros com a qualidade da oratória, pois um auditório com boa clareza e definição terá vocábulos bem-articulados. Assim, esses parâmetros estão relacionados à inteligibilidade da música

(Clareza) e à inteligibilidade da fala (Definição). A tabela 3 classifica valores para a qualidade do discurso relacionando com a inteligibilidade

Tabela 3 - Valores qualitativos para o D_{50}

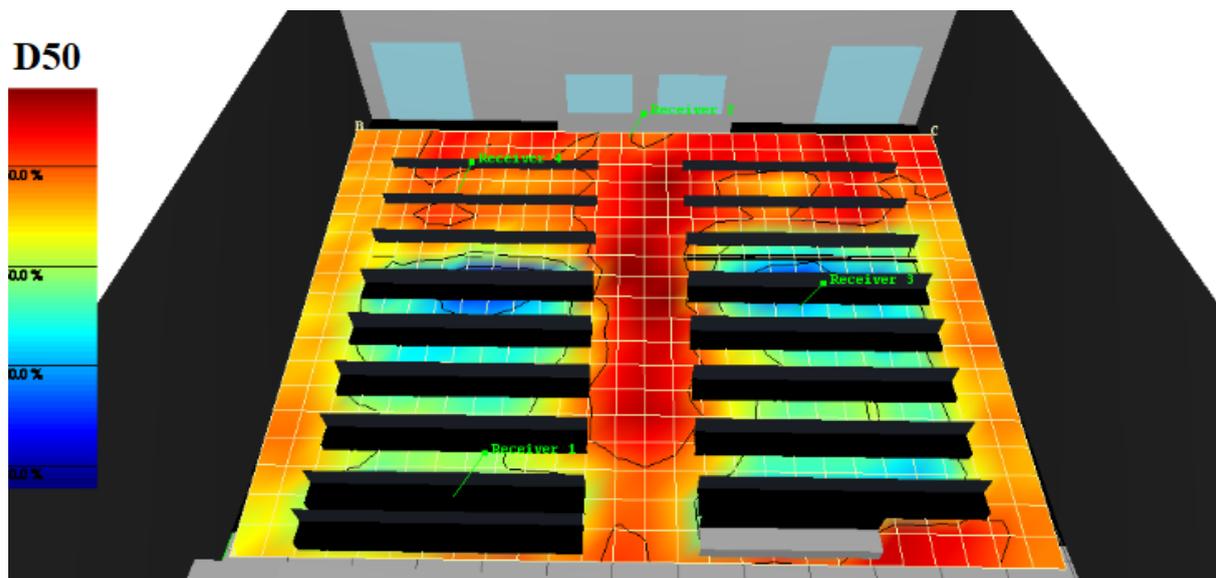
INTELIGIBILIDADE	D_{50}
Excelente	0,86 até 1
Bom	0,67 até 0,86
Razoável	0,39 até 0,67
Pobre	0,17 até 0,39
Ruim	0,06 até 0,17

Fonte: ANSAY e ZANNIN (2016)

Assim, se as primeiras reflexões apresentarem bastante energia, o som direto tende a ser experimentado como amplificado em detrimento da cauda reverberante. Se as primeiras reflexões apresentarem baixa energia ou se a cauda reverberante for consideravelmente longa, esta última será mais facilmente percebida, e tenderá a mascarar o próximo som direto que atinge o ouvinte. Dessa forma, a clareza é um termo subjetivo que descreve o grau em que os detalhes da performance são percebidos em relação ao mascaramento desses detalhes pela cauda reverberante.

Desta maneira, através da análise no I Simpa foram identificados os determinados valores para definição, como mostra a figura 19. Ressalta-se que o parâmetro D_{50} tem sido constantemente utilizado para a avaliação de salas destinadas à fala. Valores adequados de D_{50} indicam uma boa inteligibilidade da fala. Já o D_{80} não tem sido tão utilizado na análise de salas para música. Acredita-se que o uso do C_{80} tenha tornado o uso do D_{80} redundante, embora não exista nenhum motivo que impeça o uso de ambos.

Figura 19 - Definição no auditório



Fonte: O próprio autor.

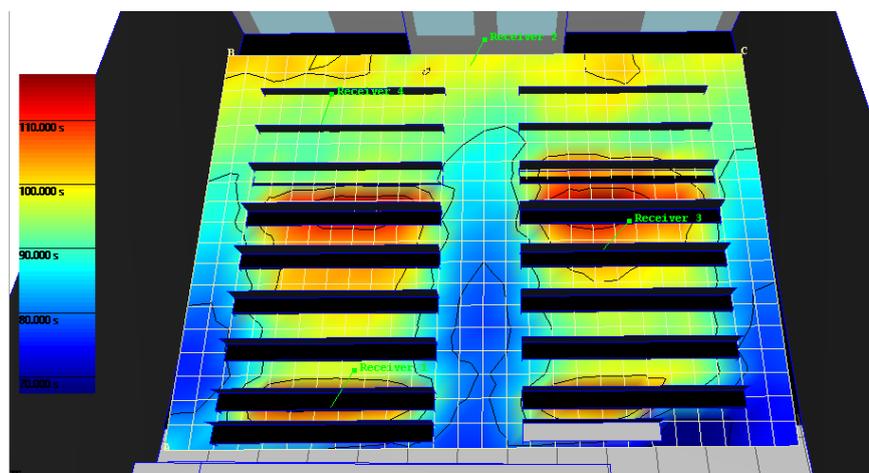
Sabendo que definição é o grau em que sons que ocorrem rapidamente em sequência podem ser distinguidos, os resultados obtidos com a figura 19 podem ser relacionados com a tabela 3. De acordo com a escala à esquerda da imagem, as zonas azuis estão associadas com um baixo nível de definição (30% aproximadamente), as zonas ciano e turquesa indicam locais com aumento da definição próximos a 50%. Nos locais em amarelo há um nível de definição próximo a 60% e em vermelho os locais onde a definição pode atingir até 70%. Principalmente nos locais dos bancos onde a maior parte da audiência está alocada, temos uma faixa de variação de 30% a 60%, indicando níveis de definição pobres, razoáveis e bom, de acordo com a tabela 3, sendo somente as duas últimas filas de poltronas englobadas pelo bom nível de definição.

4.3. TEMPO CENTRAL (t_s)

O tempo central também é uma medida do balanço entre a energia contida nas primeiras reflexões e a energia contida na cauda reverberante. Ele pode ser visto como o centro de gravidade da energia sonora (Brandão, 2016). Geralmente, um valor baixo indica uma resposta ao impulso com alta Clareza e Definição, pois a energia do impulso está concentrada nas primeiras reflexões. Como o centro de gravidade da resposta ao impulso está na região do fluxo reverberante, um valor alto de t_s corresponde a uma resposta com muita reverberação.

Dependendo de quanta absorção houver nas superfícies da sala, o tempo central (t_s) variará inversamente. Isso se explica pelo fato de que esse aumento de área de absorção provoca um decaimento mais rápido da energia sonora dentro da sala, o que leva a uma maior concentração de energia na parte inicial do decaimento e acaba por mudar o centro de gravidade da curva de decaimento para um valor de tempo menor. Os aumentos de volume da sala têm o efeito oposto, uma vez que retardam a curva de decaimento da energia, resultando em mais energia sonora concentrada no fluxo reverberante. Um valor pequeno de t_s corresponde a uma resposta ao impulso cuja energia é concentrada nas primeiras reflexões, o que, por sua vez, está associada a valores altos de Clareza e Definição.

Figura 20 - Tempo central do auditório

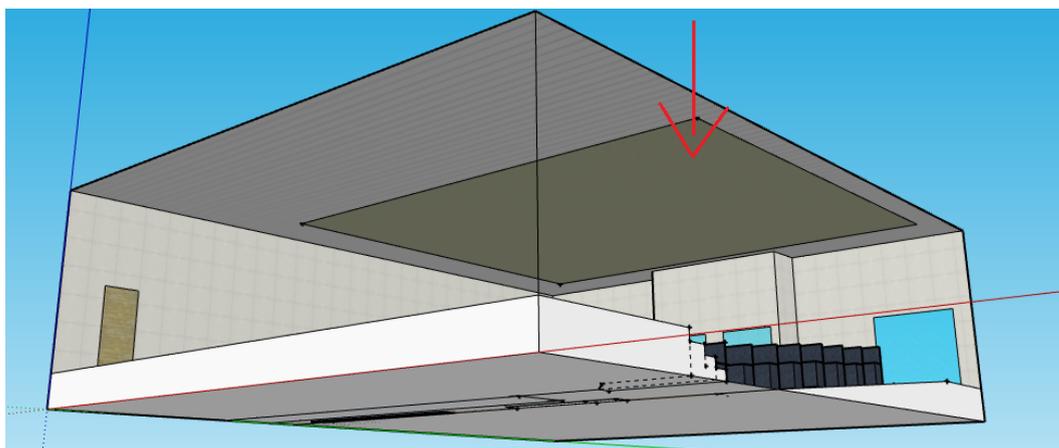


Fonte: O próprio autor

4.4. VERIFICAÇÃO DA MUDANÇA DE PARÂMETRO COM APLICAÇÃO DE MATERIAL FONOABSORVENTE

Na última etapa foi adicionado no modelo 3D uma área de 110m² no teto do auditório sobre a audiência representando a aplicação de material fono absorvente, como indica a seta vermelha na figura 21. Foram utilizadas Placas Acústicas Sonex illtec. “Utilizando o princípio das cunhas anecóicas para multiplicar a área de absorção, o Sonex illtec possui excelente desempenho acústico, representando a melhor solução para equalização dos ambientes de áudio profissional, como estúdios de gravação, locução, rádio e TV.” (OWA SONEX, FABRICANTE). Na figura 22 é possível visualizar a curva do coeficiente de absorção e a placa acústica Sonex

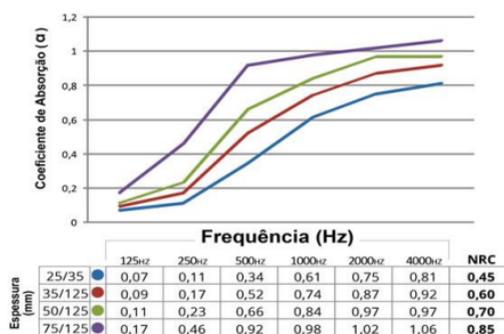
Figura 21 - Material fono absorvente



Fonte: O próprio autor.

Figura 22 - Placa perfilada acústica Sonex

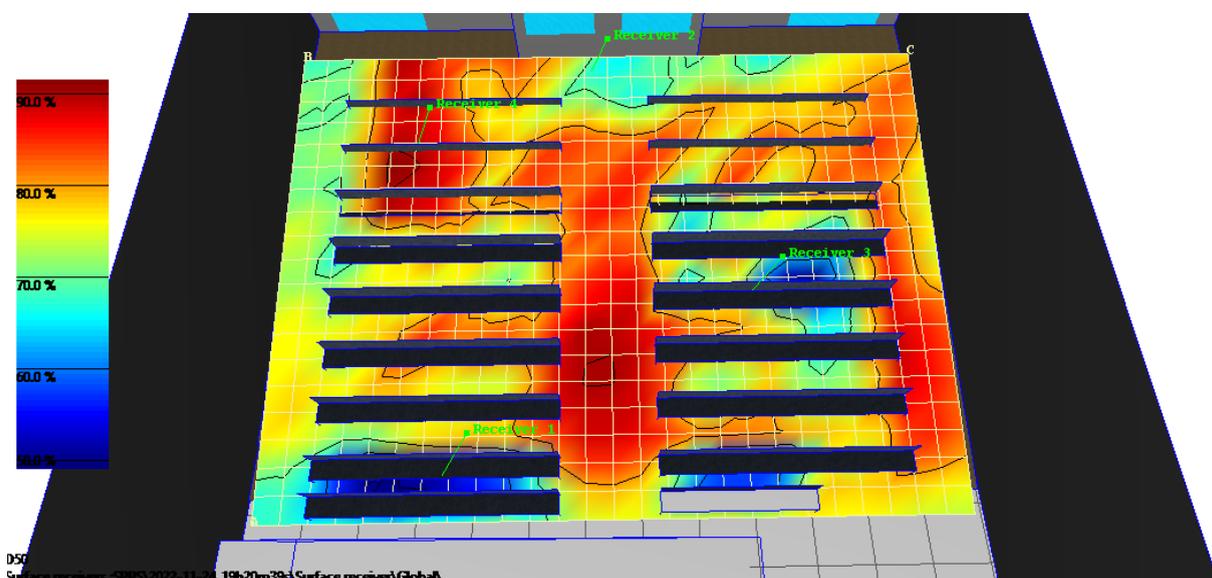
Detalhes Técnicos



Fonte: SONEX (<https://sonex.com.br/>)

A definição foi o parâmetro mais afetado após esta alteração, como indica a figura 23, pois grande parte da área da audiência ficou entre 0,7 e 0,9 sendo respectivamente bom e excelente a inteligibilidade do discurso que estes fatores proporcionam, segundo Ansay e Zannin (2006). O tempo de reverberação da sala em 500 Hz também ficou muito próximo de 1 segundo, como mostra a tabela 4, estando em acordo com o recomendado pela NBR 12 179 e com o livro acústica de salas projeto e modelagem (BRANDÃO, 2016).

Figura 23 - Definição corrigida com material fonoabsorvente aplicado



Fonte: O próprio autor

Tabela 4 - Tempo de reverberação do auditório corrigido

Frequência Hz	Tempo no receptor 1 (s)	Tempo no receptor 2 (s)	Tempo no receptor 3 (s)	Tempo no receptor 4 (s)	Média (s)
500	0,6	1,45	0,84	1,3	1,05

Fonte: O próprio autor.

Do ponto de vista das condições atuais de desempenho acústico do auditório do IFSC - Campus Lages, com o auxílio do I Simpa, observou-se que o tempo de reverberação, por meio da análise numérica, apresenta um valor muito elevado, que causa interferência na inteligibilidade da fala. E que conforme estabelecido na NBR 12.179 (ABNT, 1992) e como

estabelecido por Brandão (2016) para tempo ótimo de reverberação para auditórios com seu volume, encontra-se inadequado. Ao realizar o estudo numérico-acústico do auditório junto ao levantamento dos coeficientes de absorção dos materiais presentes no interior do mesmo através da normativa NBR 12.179, obteve-se um valor para o tempo de reverberação, ao qual se mostra muito maior que o tempo de reverberação convencional aconselhável, determinado pela fórmula de Sabine a qual é intrínseca ao método de propagação de partículas sonoras utilizada na matriz do I Simpa (Picaut e Fortin, 2012), demonstrando que no desempenho de suas funções atuais o auditório encontra-se inadequado.

Utilizando o método proposto por Brandão (2016) descrito na metodologia deste trabalho foi identificado que o ângulo de inclusão da plateia com o auditório é de $4,47047^\circ$ estando muito abaixo da especificação recomendada de projeto. Durante a concepção do auditório o ideal era que seu espaço fosse melhor aproveitado e distribuído para que aumentasse este ângulo de inclusão proporcionando uma maior distribuição e organização do espaço, de maneira que, orador, ouvinte e tela de projeção, respectivamente, pudessem estar mais próximos entre si. Nesta hipótese, os ouvintes das últimas fileiras não seriam impactados pelo grande número de reflexões do som emitido pelas fontes, proporcionando um maior conforto auditivo. Na realidade, devido ao baixo ângulo de inclusão, em uma solenidade com auditório lotado, os ouvintes das últimas fileiras são impactados gradualmente pelas reflexões devido a baixa absorção acústica do concreto das paredes, reduzindo o conforto acústico do ambiente, como foi evidenciado pela simulação numérica. O ideal é projetar pensando nos materiais e na geometria do espaço no momento da concepção inicial da edificação, isso não aconteceu no auditório do IFSC - Campus Lages, o que ocasionou a construção de um espaço sem adequação às atividades que ali são desenvolvidas. Para mitigar esses problemas, a solução encontrada foi estudar e desenvolver uma proposta que solucionasse os problemas e colocasse o auditório dentro dos padrões incluídos na norma. A proposta de solução encontrada foi a aplicação de placas SONEX numa área de 110 m^2 sobre a audiência do auditório.

5. CONCLUSÃO

Foram criados vários modelos de salas baseados no auditório do IFSC Campus Lages e executadas diversas simulações com a finalidade de se chegar o mais próximo do auditório real. Mediante aos resultados das simulações numéricas descritos neste trabalho concluiu se que:

- O auditório não foi idealizado pensando em conforto acústico no momento da concepção, sabendo que o ângulo de inclusão da platéia é muito baixo;
- Os níveis de reverberação do auditório estão praticamente 3 vezes acima do que o recomendado pela ABNT NBR 12 179;
- Devido ao alto nível de reverberação dentro da sala, a definição também é afetada estando em um nível ruim, de acordo com Ansay e Zannin (2016).
- É necessária a aplicação de material fono absorvente para adequação da reverberação e definição.

6. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Sugere-se para o desenvolvimento de futuros trabalhos:

- Levantamento de custos para aplicação das propostas de soluções de problemas deste trabalho;
- Estudar os demais parâmetros não tratados neste trabalho como o Índice de Transmissão de Fala, Fator de Força, *Early Decay Time*, Claridade (STI, G, EDT, C50,) a fim de avaliar a inteligibilidade da fala e as demais aplicações do auditório;
- Verificar se após execução das alterações, o auditório alcançou os parâmetros estipulados neste trabalho;
- Se houver equipamento disponível (fonte omnidirecional, interface de áudio, *poweramp*, microfone receptor e decibelímetro), realizar medições *in loco* para verificar o quão assertiva esta simulação foi.

REFERÊNCIAS

ANSAY, S. Henrique et al. **USING THE PARAMETERS OF DEFINITION, D50, AND REVERBERATION TIME, RT, TO INVESTIGATE THE ACOUSTIC QUALITY OF CLASSROOMS**. Laboratory of Environmental and Industrial Acoustics and Acoustic Comfort, UFPR, 2016.

ALMEIDA, Thiago Martins. **Análise e tratamento acústico para estúdios musicais**. 2010. TCC (graduação em engenharia mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, São Paulo.

BRANDÃO, E. Acústica de salas. Editora Blucher, 2016. 9788521210078. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521210078/>. Acesso em: 14 Sep 2021

Bradley JS, Sato H. **The intelligibility of speech in elementary school classrooms**. J Acoust Soc Am. 2008 Apr;123(4):2078-86. doi: 10.1121/1.2839285. PMID: 18397015.

C.A. Ronan, História Ilustrada das Ciências, Universidade de Cambridge (Ed. Zahar, 1987)

DE ALBUQUERQUE, E.; DUARTE, C.; VIVEIROS, E. **Desempenho acústico na arquitetura residencial brasileira: paredes de vedação Acoustical performance of Brazilian dwellings: party walls**. [s.l: s.n.]. Acesso em: 28 nov. 2022.

D.; GAIDA, C *et al*. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA CENTRO DE TECNOLOGIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES ACÚSTICAS DE SALAS DE AULA DESTINADAS AO ENSINO DA MÚSICA NA EDUCAÇÃO BÁSICA**, 2012. [s.l: s.n.].

DONOSO, José Pedro. **História da acústica 1**. Sem data. Universidade de São Paulo - Instituto de Física de São Carlos - IFSC. São Paulo.

GAUDEOSO, C.; BARBO, M.; BRANDÃO, E. Tutorial para o uso do software gratuito de simulação em acústica geométrica: I-Simpa. **XXVIII Encontro da SOBRAC**, v. 01, 2018.

HERRMANN, J. **MEDIÇÕES E SIMULAÇÕES DE ÍNDICES DE TRANSMISSÃO D E FALA, DEFINIÇÃO E TEMPO DE REVERBERAÇÃO EM SALAS DE AULA**. 2018.

JUDICAËL, P.; FORTIN, N. **SPPS, a particle-tracing Numerical Code for Indoor and Outdoor Sound Propagation Prediction**. Disponível em:

<<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00810894/document>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

JUDICAËL, P. **I-Simpa Documentation**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://i-simpa.univ-gustave-eiffel.fr/support/documentation/for-users/> Acesso em: 20 Sep 2022.

MACARINI, M. **MATERIAIS, TÉCNICAS E PROCESSOS PARA ISOLAMENTO ACÚSTICO**. Novembro 2006 [s.l: s.n.].

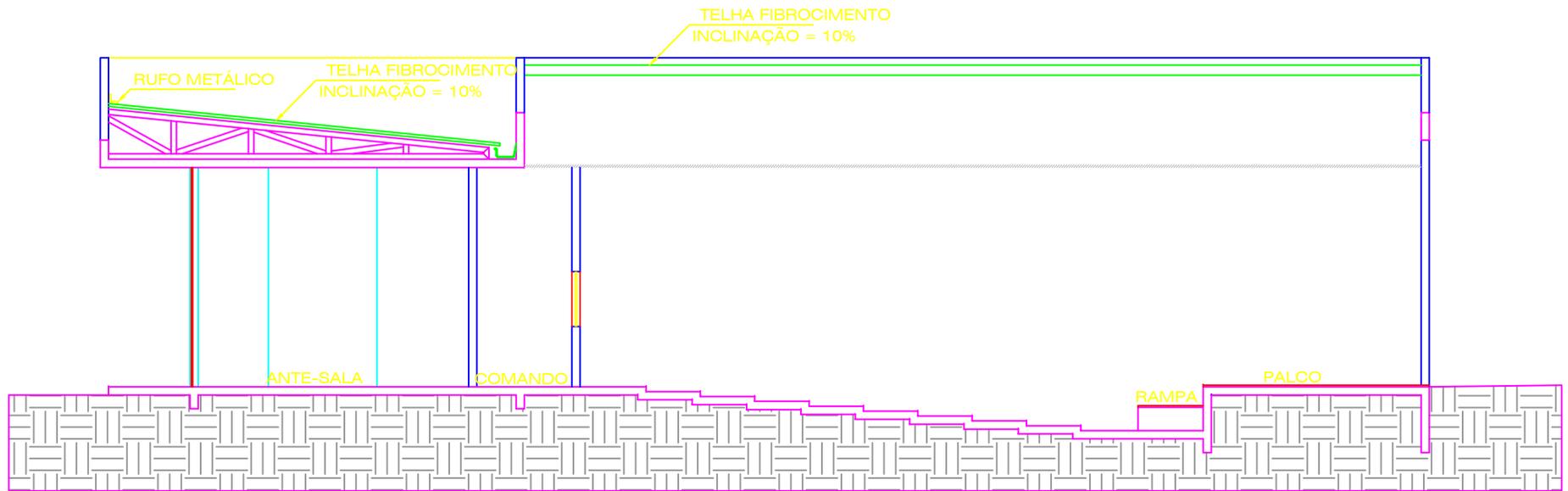
PACHECO, Claudia; BAÊ, Tutti. Aparelho fonatório: laringe, pregas vocais e fonação: laringe (elementos vibrantes). Canto: equilíbrio entre corpo e som: princípios da fisiologia vocal. São Paulo: Irmãos Vitale. 2006. cap. 2. p. 33-42.

PEREIRA, D.; COSTA, D. Proposta de adequação acústica em auditório de uso múltiplo. [s.l: s.n.]. Fevereiro 2019

RONSSSE, Lauren M. **Relationships between unoccupied classroom acoustical conditions and elementary student achievement measured in eastern Nebraska**. The Journal of the Acoustical Society of America 133, 1480 (2013). Disponível em: <https://asa.scitation.org/doi/pdf/10.1121/1.4789356>. Acesso em: 14 Sep 2021

SERRANO, Giordani Pablo et al. **Inteligibilidade, como medi-la?** Portal Acústica, 2016. Disponível em: <http://portalacustica.info/inteligibilidade-como-medi-la/>. Acesso em: 14 Sep 2021.

ANEXO A – PLANTA BAIXA DO AUDITÓRIO



13 CORTE AA' AUDITÓRIO
ESCALA 1/50

